

報告書概要

技術研究開発 課題名	堤防の3次元変状等をモバイルマッピングシステム（MMS）、高精度高密度航空レーザ測量システムにより広域かつ高精度に把握する探査技術
技術研究開発 テーマ名	河川管理のためのモニタリング手法の合理化・高度化技術
研究代表者	
氏名	所属・役職
西山 哲	京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻 准教授
共同研究者	
氏名	所属・役職
島村 秀樹	株式会社パスコ
吉岡 裕嗣	株式会社パスコ
船田 征	株式会社パスコ
橘 菊生	株式会社パスコ
間野 耕司	株式会社パスコ
東 良慶	京都大学防災研究所 助教
石川 貴一朗	早稲田大学理工学部 総合研究センター
木元 勝一	三菱電機株式会社
原田 雅之	三菱電機株式会社
佐藤 雄一郎	三菱電機株式会社
【1】背景・課題	
<p>●背景</p> <p>我が国の河川堤防は、各河川の整備計画・基本方針に基づき順次整備されつつある。しかし、近年の気候変動に伴うゲリラ豪雨等による堤防決壊などの甚大な被害が多発する傾向にある一方で、我が国の管理に要する財政が厳しくなっている現状を鑑みると、従来の河川の管理手法をより一層効率化することが求められる。現状では河川計画および管理に必要な資料を得るために定期縦横断測量が行われているが、この測量では距離標をもとに200m間隔の河川断面形状のデータしか得ることができない。このような現状で、今では以下の項目に対応する河川管理業務も要求されている。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 予算の緊縮化にともなう日常の維持管理業務の効率化 ② 気象変動にともなう豪雨による堤防決壊などの甚大な被害への対処 ③ 洪水や震災により変状した堤防の早期復元・モニタリングの高度化 <p>近年測量分野においては、走行車両に搭載したレーザスキャナを用いて、広域を迅速かつ効率的に測量する技術が普及している。本研究開発は、産学の専門家による開発体制によって、このレーザ測量を</p>	

堤防のモニタリング技術に適応することを狙うものである。これにより日常管理だけでなく豪雨時や地震などの災害発生時において、広域にわたる河川堤防の状態を迅速かつ的確に把握できる技術、すなわち従来の断面管理から面的なモニタリングで堤防を管理することができる新しい堤防用レーザ計測技術を実現させることが可能となる。

これまでの測量機器や GPS を用いた人的労力に頼った縦横断測量による管理が実施されてきた一方で、広域を効率的に測量できる航空レーザ測量が導入されてきた。前者の縦横断測量技術では、広域を迅速に測量することが困難である。後者の航空レーザ測量では、計測距離の問題等のため軟弱な基盤上や堤防本体の土質性状特性による堤防沈下や変位を高精度で求めることができない。

そのため、現在、土木構造物の維持管理に応用されつつある走行車両搭載型レーザスキャナの導入により、両者の欠点を補う新しい計測技術を図ることが考えられる。しかし、数mの距離にある対象物の変状を定性的に把握する技術は開発されているが、高精度で堤防本体の変状を定量的に抽出する技術は開発されていないのが実情である（表1）。

表1 車両走行による計測法の位置づけ

	利点	課題
GPS 測量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1 mの間隔（線的）で計測できる ・ 従来手法と同等の精度で縦断測量では 50%のコスト低減を実現 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 堤防肩あるいは堤防中央を線的に計測する ・ 航空レーザより安価であり、計測は容易に計画できるが人的労力を必要とする。
航空レーザ測量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 堤防を中心に 100m の範囲を 35cm の間隔（面的）で計測できる ・ GPS 手法と同等の精度の確保が困難 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高精度化が困難 ・ 計測計画の立案などに手間を要し迅速な計測が困難
本手法（車両走行）	<p><航空レーザと GPS の利点を保持></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 地盤沈下に加え、嵩上げ、腹付け盛土、堤体強化等による堤防沈下を 1 年間隔で捉えるために必要な 20mm の計測精度が確保できる。 ・ 堤防を中心に連続的かつ面的な計測が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ レーザ照射距離や密度と計測精度の関係が未知である。 ・ 適した走行速度の設定などの計測技術が未確立。 ・ 植生の影響などを考慮する必要がある。

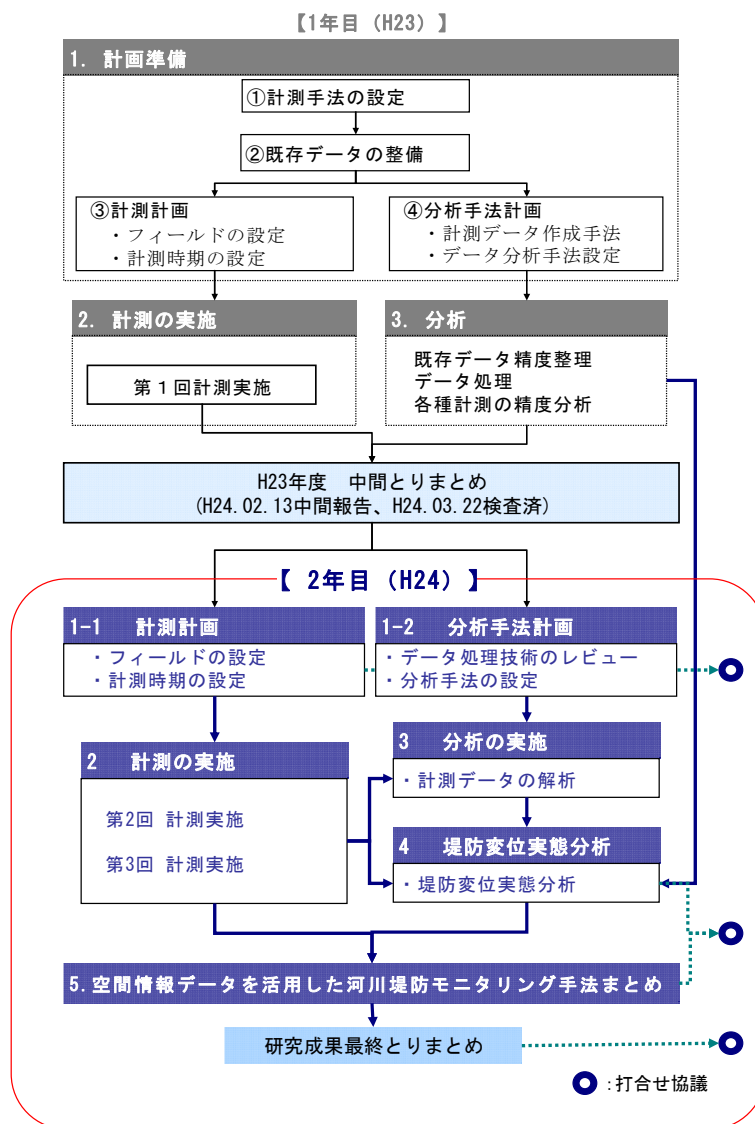
【2】技術研究開発の目的

本研究開発は、広域を迅速かつ簡便に測量する車両搭載型レーザスキャナを河川堤防管理用モニタリング技術へと高度化させるためのハード開発とソフト開発を実施し、新しい河川堤防管理手法を実現させることが本研究開発の目的である。

具体的には、広域で面的かつ高精度のモニタリングを実施するためのレーザスキャナの開発と瞬時に変状を定量的に把握できるソフト技術を組み合わせ、車両で走行するだけで堤防の状態を的確に把握できる河川管理技術を構築することを目的とする。

【3】技術研究開発の内容・成果

平成 23 年度までに 30m の距離で±20mm の計測精度を照射距離 500m 以上，照射密度 30 万点／秒以上のレーザスキャナ搭載車両で実現できることを相模川で実証した．平成 24 年度はそれら技術の高度化による新しい河川管理技術の実用化を図った．図－1 に本研究開発の全体概要を示す．



図－1 本研究開発の全体概要

<平成 23 年度の成果>

1. ハード技術の開発：堤防変位計測用車両搭載型レーザスキャナの開発

道路周辺の構造物の3次元座標を走行しながら取得するための技術として，共同開発者である三菱電機(株)とパスコ(株)によって図－2に示すような車両搭載型レーザスキャナを利用したモバイルマッピングシステム(以下MMSと称する)が開発されている．平成23年度の研究開発の結果，河川堤防管理に対しては30万回/秒以上の高密度照射で対象部の3次元座標を取得するレーザスキャナを搭載した車両が適する仕様であると結論できた．具体的には，次の仕様を有するものが河川堤防管理用として活用できる．

- (1) 前方上面用と前方下面用の 2 段のレーザスキャナを有するものとする。なお、平面位置・高さ精度は従来の GPS 測量と同等で、計測距離は 200m が可能なものとする。
- (2) レーザ照射密度は 30 万回/秒レベル、走査範囲は 180 度のスキャナを有するものとする。
- (3) 500 万画素のデジタルカメラを有するものとする。

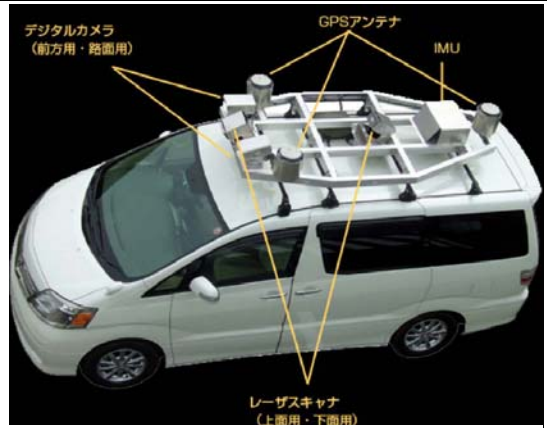


図-2 車両搭載型レーザスキャナを利用したモバイルマッピングシステム

図-3 に示すように、現在市販されている MMS のレーザ仕様において、レーザの照射距離が近距離タイプのもの（以降、近距離レーザ搭載 MMS と称する）と遠距離タイプのもの（以降、遠距離レーザ搭載 MMS と称する）ではレーザ点群の取得状況に相違があり、近距離レーザ搭載 MMS では天端走行によって河川堤防全

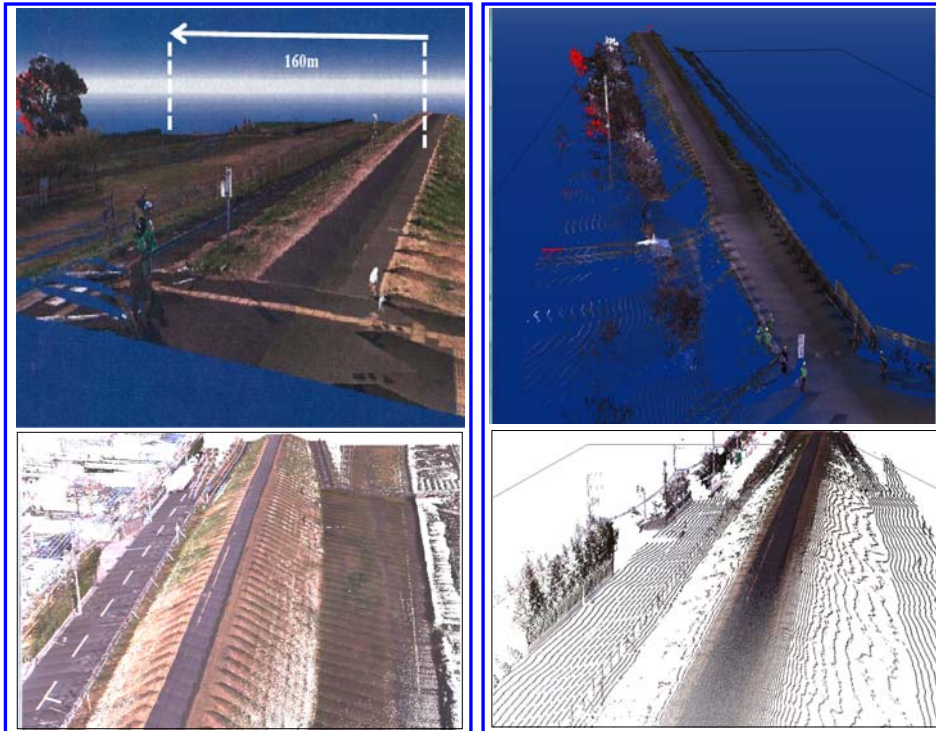


図-3 レーザ機器の照射距離による取得点群の相違
遠距離レーザ（左）と近距離レーザ（右）

体を把握することが困難であることが明らかになった実験結果に基づく。

一方、車両走行での計測を考えた場合、計測精度は MMS からの計測距離に比例して悪くなり、遠距離レーザ搭載 MMS では計測精度の確保が難しい。計測距離に対する計測誤差範囲を理論的に推定すると、水平面を計測する場合の仮定の下で計算した理論精度は図-4 のようになる。水平および鉛直方向の計測精度の両方とも赤色の斜線で示された範囲が GPS の受信が良好な時に起こりうる理論上での誤差範囲である。従って、現在の MMS による計測では、

50m の照射距離において水平位置および標高の精度共に 100mm 程度の精度になると考えられる。

2. ソフト技術の開発

上記高精度・高密度のレーザデータを解析する技術によって、計測結果から経年変位を面的に把握するモニタリングを可能にした。レーザデータ処理ソフトは共同開発者である早稲田大学と共同して研究開発し、同じく共同研究者の京都大学・東助教とパスコ(株)の支援のもとに堤防管理のための変状抽出・変状解析技術を実現させたものである。具体的な成果は次の通りである。

- ・ 堤防天端の変状を面的に捉えて、経年変化の変状を GPS 測量と同程度の精度で計測した。
- ・ 堤防法面の変位の面的変状を同じ GPS 測量と同程度の精度で捉えることを可能にした。
- ・ 堤防の変位が現れた区間の堤体において、土質性状を踏まえた堤防変位を解析する技術と組み合わせ、計測結果の検証を相互に実施するシステムを構築した。

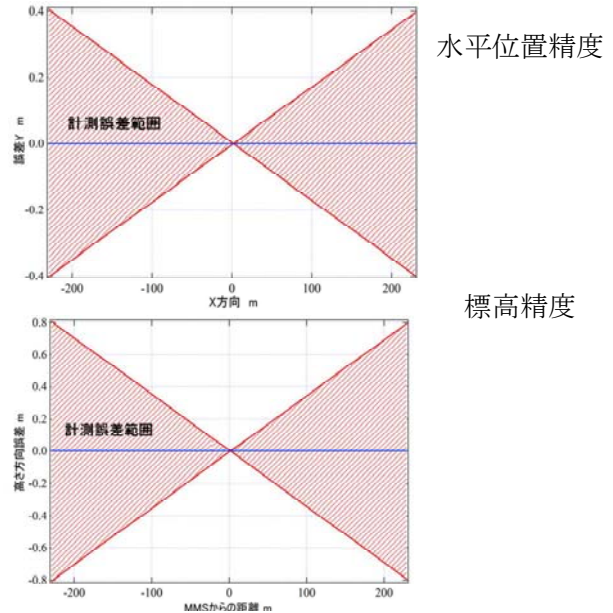


図-4 計測距離と計測精度の関係

<平成 24 年度の成果>

1. 高精度計測の再現性と汎用性の実証

円山川にて検証点の計測精度を TS (トータルステーション) 測量と比較を行った。レーザの位置・姿勢制御技術の完成により、GPS 受信状況が不良な円山川でも本計測精度の確保を可能にし、どの河川でもすぐに本計測手法を導入できる計測技術を確立した。本研究開発で

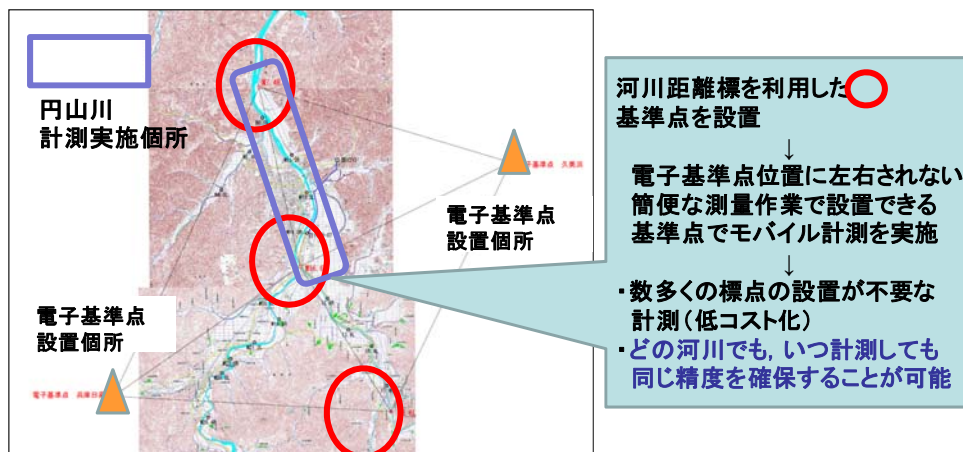


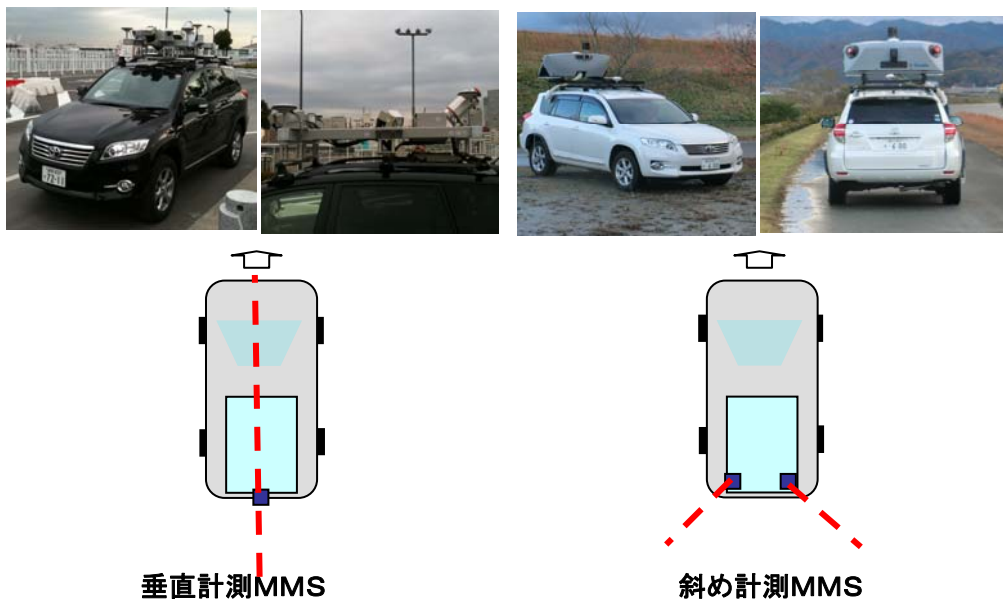
図-5 河川距離標を利用した基準点の設置 (兵庫県円山川)

は、図-5 に示すように、始点および終点付近の距離標を新設の基準点として独自に設けて、これを基に MMS の位置姿勢を補正する技術を開発した。

この新設基準点は、電子基準点を用いた基準点測量および国家水準点を利用した水準測量

を実施して、水平位置及び標高を正確に求めた。具体的には、距離標上に標識を設置し、取得されたデータ上で当標識の座標値を観測し、既知点座標との調整計算を実施することで、個々の観測時の系統的な誤差を排除し、計測区間全域の精度を保つ工夫である。これにより、計測を複数回実施した場合でも、また、異なる時期に計測した場合でも、基準点設置により位置精度が確保でき、それぞれのデータの比較が可能となった。

MMS には、レーザスキャナの照射の方向が走行方向に対して垂直な場合（以降、垂直計測 MMS と称する）と、斜めの場合（以降、斜め計測 MMS と称する）がある。図－6 に垂直計測 MMS と斜め計測 MMS の機器配置を示す。平成 24 年（2012 年）度第 2 回目の計測では、垂直計測 MMS と斜め計測 MMS の 2 種の MMS による計測を実施した。それぞれの計測器を用いて、



図－6 垂直計測 MMS と斜め計測 MMS の機器配置. 赤点線はレーザスキャナの照射方向を示す。

表－2 に示す計測時期に測定を実施した。

平成 24 年（2012 年）度第 2 回目の堤防天端計測結果の精度は表－3 の通りで 14～22mm 程度の精度が確保されている。前年度（平成 23 年（2011 年）度）に相模川で実施した同様の精度検証では、車速 10km/h で平均高さ較差 16.7mm, 車速 30km/h で平均高さ較差 9.7mm であった。このことから、計測時期・MMS 機材が異なっても、標準偏差は±20mm の精度が確保されており、MMS 点群の再現性は高いことが確認できた。

また、表－3 の結果では垂直計測 MMS と斜め計測 MMS との計測精度に大きな差がないことがわかった。このことから、現在市販されている MMS の機種依存性が無いことも確認できた。

表－2 計測器の種類と実施時期

	MMS 機材	計測時期	走行速度
①	垂直計測MMS	2012 年 9 月	約 10km/h
②	垂直計測MMS	2012 年 11 月	約 10km/h
③	斜め計測MMS	2012 年 11 月	約 10km/h

表-3 堤防天端計測結果の精度

MMS 機材	①	②	③
	垂直計測MMS		斜め計測MMS
計測時期	9月計測データ	11月計測データ	11月計測データ
平均値(m)	0.0144	0.0181	0.0221
標準偏差(m)	0.0086	0.0114	0.0121

図-6は、実測値とMMS点群から算出した座標値の較差を、レーザ照射距離を横軸に取った位置正確度で示したものである。

本検証の結果、レーザ照射距離100m先の較差は約20cmであり、図-4で示したレーザ照射距離に基づくMMSの理論精度を上回る位置正確度が確保されていることが確認できた。また、昨年度(平成23年度)相模川で実施した検証結果と同等の値を示していることから、MMSによるレーザ計測は、再現性と信頼性が高いことが確認できた。

一般にレーザ計測では、照射距離が長くなるにつれ、レーザのフットプリントが拡大し、レーザ点群の点間隔も広くなる。また、レーザ機器の取り付け角のキャリブレーション誤差や、システムの姿勢角度計測誤差の影響も大きくなる。こうした要因により、レーザ照射距離に比例してレーザ点群の位置正確度が劣化する傾向があると考えられる。

本検証結果でもレーザ照射距離に依存して点群の位置正確度が劣化していることが改めて確認できた。今回使用した機器のうち、斜め計測MMSでこの傾向が顕著である。これは、使用しているレーザ計測装置は同一機種であること、姿勢角度計測装置の性能等を勘案すると、この誤差の要因はレーザ機器の取り付け角のキャリブレーション誤差に起因するものと考えられる。

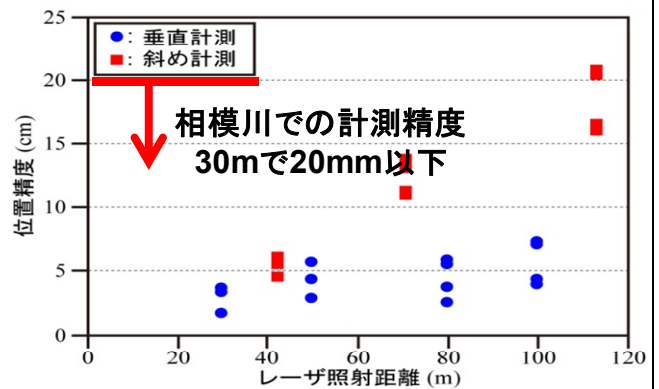


図-6 平成24年度の計測における実測値とMMSとの座標値の較差

2. 変状箇所抽出技術: 1回の計測で異常箇所をスクリーニングする技術の完成

、Ransac(ランダムサンプリングコンセンサス)による法面方向の凹凸解析を行い、レーザ点群から堤防の形状を3次元で把握した。

区間毎にRansacアルゴリズムを用いて平面を算出し、それらの平面と点群の法線距離を算出した。

図-7の例で赤い凸部分は、はらみだしの傾向が現地調査で確認出来た地点である。このように凹凸の大きな箇所を抽出すること

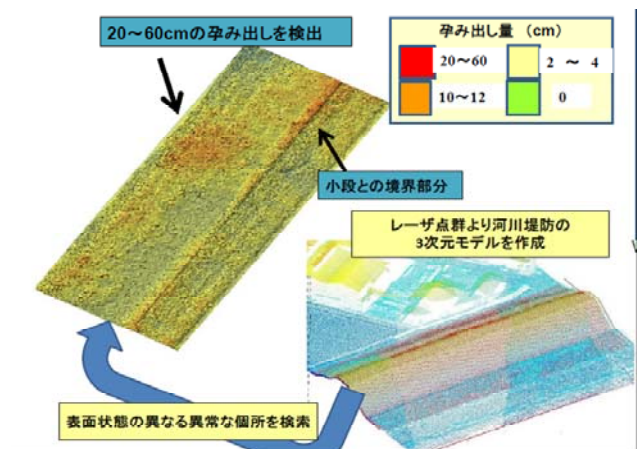


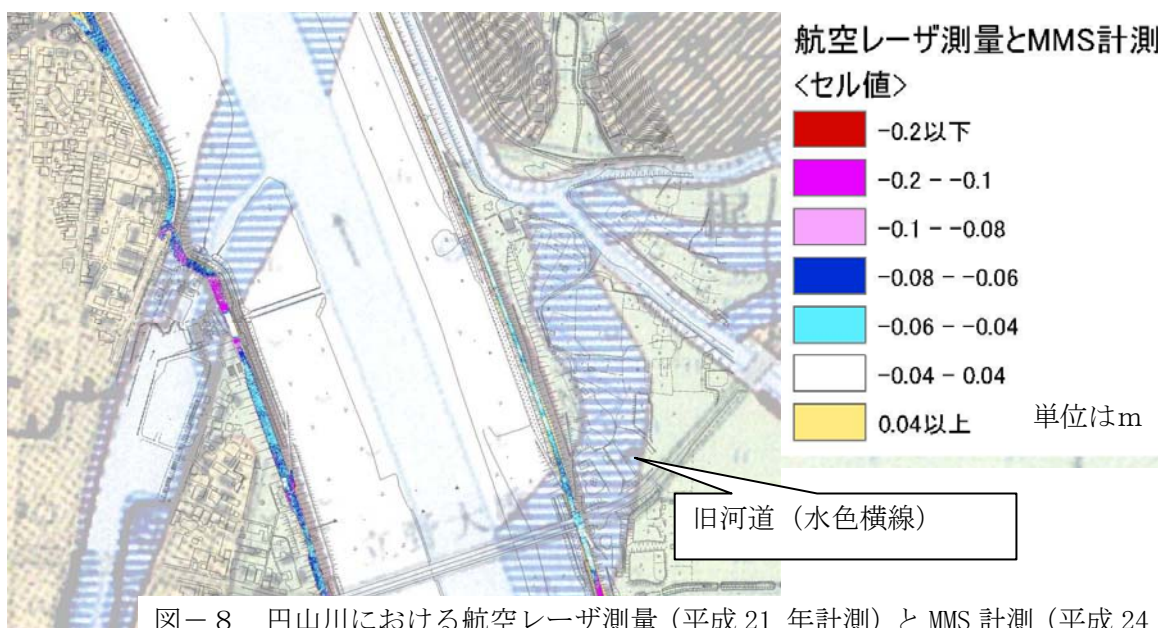
図-7 レーザ点群による異常箇所抽出例

で“沈下”，“孕み出し”箇所を検出．重点的に調査が必要な箇所を見つける作業として有用であることを実証した．

3. 堤防形状の経年変化分析技術の構築

“どこが，どれだけの期間で，どのように変化したのか”を把握するため，設計断面や過去のデータとの重ね合わせ技術を構築した．

図－8は，MMS計測(H24)と航空レーザ測量(H21)の堤防天端の高さ差分と治水地形分類図を重ね合わせたものである．図に示すように，赤系色は当初よりも地盤高が低くなったことを示してい



図－8 円山川における航空レーザ測量（平成 21 年計測）と MMS 計測（平成 24 年計測）による経年変化解析．

る．また，治水地形分類図には旧河道が明示されており，今回の 2 時期の差分解析で堤防の沈下を示す赤系色は旧河道とその周辺で生じていることがわかる．

このように，高さ差分と治水地形分類図を重ね合わせたモニタリング技術は，河川堤防管理における重点区間抽出や堤防沈下，変状対策を行った場所のモニタリング管理に大いに役立つことが明らかになった．

4. 堤防のモグラ穴，亀裂の検出

レーザ点群によるパソコン画面上での「亀裂」「モグラ穴等の小動物の穴」の観測を行った．この観測で認識可能な「ひび割れの幅」および「穴の直径」を調べるために，それらを模擬した模型を堤防法面に設置し，検出能力を検証した．その結果，以下のような知見が得られた．

- ・ レーザ点群の標高ごとに色分けをした断採図より，走行車両に近く，レーザ点群の密度が高い場合は，レーザ点群の粗密から穴の存在が検知できる．(図－9)

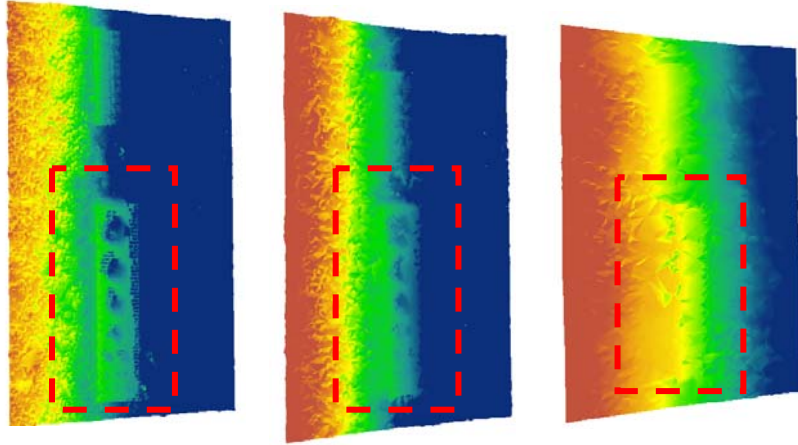


図-9 車両位置から 4.0m (左), 12.4m (中), 18.0m (右) 先のパネル部分の点群データの標高段彩図。レーザ点群から内装補完処理により面データを作成し、段彩表示したもの。

- ・ レーザ点群の密度はレーザの照射距離と照射する角度に依存するため、車両走行位置も検出に大きく関与する。
- ・ 本検証では、以下の大きさの穴を検知することができた。ただし、いずれも時速 10km で走行した場合であり、走行速度が変わると検出能力も変化する。
直径 10cm の穴は、5cm の点間隔のレーザ照射で検出可能である。
4cm の幅で長さ 90cm の亀裂は、2cm の点間隔のレーザ照射で検出可能である。
- ・ 法面の穴は天端走行では認識されず、穴の検出には車両走行位置の関係が重要であり、車両から穴が“見えにくい”個所にある場合は検出も困難であることから、穴の検出を目的とした計測には法尻個所の走行等を考慮する必要がある。

5. 低コスト化の実証による本技術の普及の検証

費用対効果は、巡視点検の費用と本研究開発の計測手法の費用を算出して比較する。巡視点検の費用は、各地方整備局の積算基準が公表されているが、ここでは、大和川河川事務所での巡視点検事例を踏まえ、委託業者が実施する場合に必要な人員および工数をもとに積算する。また、遠距離レーザ搭載 MMS の計測では、本研究開発の対象地である相模川および円山川の実績をもとに積算する。

さらに、本成果の河川カルテへの利用および活用という観点で、本手法の導入の効果を述べる。

(1) 巡視点検の費用

巡視点検は、堤防 5 名（表法面 2 名、天端 1 名、裏法 2 名）および低水部 2 名による調査、資料整理の項目で積算した。

費用は、以下のように設定する。

- ・ 河川堤防延長 40km あたりの巡視点検費用（法面、堤防護岸、小段、天端、裏法尻部、堤脚水路、高潮堤）を A とする。

- ・ 堤防以外の河川管理施設（特殊堤、陸閘、樋門等構造物）の巡視点検費用を B とする。

上記の A および B は、出水期前、台風期、出水後の各点検項目にあわせて費用を算定する。

(2) 遠距離レーザ搭載 MMS の計測の費用

遠距離レーザ搭載 MMS の計測では、MMS 計測、新設基準点測量、位置姿勢補正処理、変状評価データ作成、成果品作成の工程をもとに積算した。

費用は、以下のように設定する。

- ・河川堤防延長 40km あたりの遠距離レーザ搭載 MMS の計測費用を M とする。

(3) 費用の比較

表－４は、巡視点検と遠距離レーザ搭載 MMS の計測の費用を比較した結果である。

本手法導入による費用対効果を検討した。

- ・巡視点検の費用（年間）： 22 百万円（点検項目：156）
- ・本手法の適用（年間）： 11.5 百万円（点検項目：71）

留意事項としては、本計測の適用に当たっては除草作業が必要である。

表－４ 本手法導入による費用対効果の検証

点検時期	巡視点検の費用 (A+B)	点検 項目総数	本手法での費用 (M)	MMS 項目数	目視点検 項目数	計測条件
出水期前	8,000,000	67	4,000,000	37	30	除草と天端と法尻
台風期	6,200,000	30	3,500,000	7	23	天端と法尻
出水後	7,800,000	59	4,000,000	27	32	除草と天端と法尻
合計（1年間）	22,000,000	156	11,500,000	71	85	

6. まとめ

(A) 遠距離レーザ搭載 MMS のレーザ計測技術の成果

- (1) 堤防の天端は、時速 30km 以下の走行で、高さ±20mm の精度で計測できる。
- (2) 堤防の天端は、時速 10km で走行した場合に、進行方向 4 cm ，横断方向 2 cm 間隔で計測できる。
- (3) 堤防では、30 m までの距離の場合、位置精度 40 mm 以内の精度で計測できる。
- (4) 堤防では、30 m 離れた場所で点間隔は約 0.1m で計測できる。
- (5) 河川の距離標の上に新設基準点を設定することで、計測を複数回実施した場合や異なる時期に計測した場合に、それぞれのデータの比較のための位置精度が確保できる。
- (6) 堤体を正確に捉えるためには、除草が必要である。
- (7) 小段から下の法面のレーザ点群を増やすためには、法尻からの計測が必要である。
- (8) 亀裂や穴の検出は、直径 10cm の穴は、5cm 点間隔が必要であり、4cm の幅で長さ 90cm の亀裂は、約 3cm 点間隔のレーザ点群が必要である。そのために、レーザ機器の性能を高めるか、もしくは、法尻からの計測が必要である

(B) 遠距離レーザ搭載 MMS のレーザ計測データによる分析技術の成果

- (1) 堤防の天端の変状は、定期横断測量では捉えることができない面的な変位を詳細に捉えることができる。
- (2) 堤防の法面の変状は、面的な凹凸を捉えることができる。
- (3) 時期の異なるデータを用いて、天端や法面の変状、沈下の状態を面的に把握することができ、さらに、定量的な評価も可能となる。

以上の成果から、遠距離レーザ搭載 MMS は、堤防の天端から、小段を含む法面、法尻までを高い精度で計測できることが確認できた。すなわち、天端から 30 m の範囲である。また、亀裂や穴を検出するための、点群の点間隔を導き出すことができた。さらに、レーザ計測データによる分析技術では、変状を面的に捉える手法を開発できた。

【4】今後の課題・展望

今後の展望としては以下のような項目が考えられる。

1. 河川堤防を効率的に計測するための遠距離レーザ搭載 MMS の改良

本研究開発の計測対象とした円山川では、法尻側からの走行ができない箇所が多くあった。そのために、法尻走行による計測の代替技術が必要である。それは遠距離レーザ搭載 MMS の改良である。

(1) 遠距離レーザの設置位置の変更

本研究開発の結果を分析すると、法勾配が 2 割勾配の円山川で、MMS に搭載した遠距離レーザは、天端から斜め 58 度の角度までの対象物を的確に捉えている。すなわち、小段でレーザ光が遮られる手前の、天端から小段までの間である。そこで、天端から小段を越えて法尻まで計測できるようにするためには、レーザ機器の角度はそのまま、設置位置を高くすれば良い。

よって、MMS 車両の高さを含めて、レーザ機器の位置を地上から 4 m の高さになるように改良することで、堤体全体のデータを取得できるようになる。

(2) デジタルカメラの設置位置の変更

本研究開発で使用したカメラは、車両の進行方向に対して、横向きのカメラは 1 台である。そのために、レーザ機器と同様に、小段から下の法尻周辺は写っていない。また、斜め前方のカメラでは、法尻までの距離が遠いために、画像の解像度が悪くなっている。そこで、横向きに 3 台のカメラを縦に設置すれば、堤体を地上 5mm 以上の解像度で撮影することができる。例えば、1 台目を天端から法面に、2 台目を小段から下の法面上部に、3 台目を 2 台目よりさらに下の法面に向けて設置すれば良い。

以上の改良により、天端走行だけで、堤体全体を捉えることが可能となる。また、この改良には、車両の上に遠距離レーザおよびカメラを載せる河川用の架台の作成が必要であり、約 3 ヶ月を見込む必要がある。ただし、これらは、遠距離レーザ搭載 MMS に、河川用の架台、もしくは、標準架台を取り付けるかの設置の選択であり、新たに費用が発生するものではない。

2. 今後のレーザ機器の性能向上

本研究開発で使用した遠距離レーザ搭載 MMS は、レーザ照射密度が 30 万点/秒である。これにより、1:2 の法面勾配で、横断方向の 5m 離れた位置で 2.5cm、15m 離れた位置で 17.1cm の間隔でレーザデータが取得可能となる。また、走行方向の間隔は、時速 10km 走行時において 5.6cm で取得可能となる。

レーザ機器の性能向上は著しいものがあり、最新の遠距離レーザ機器ではさらに性能が向上し、レーザ照射密度が 55 万点/秒が可能となっている。この機器を用いた場合、横断方向で 5m 離れた位置では 1.4cm、15m 離れた位置でも 9.3cm の間隔でのデータ取得が可能となる。すなわち、現状の点間隔の半分近くで、点密度が 3 倍程度になる。レーザ機器を通常より高く設置した場合と通常の高さに設置した場合のレーザ点の間隔を表-5 に示す。

レーザ機器の性能が 55 万点/秒で、改良した高さ 4.0 m で計測すると、天端と同様に法面でも、レーザ点密度が高まり、よりの確に堤体を計測することが可能となる。特に、点密度が重要となる 1m

表-5 MMS からの距離に対するレーザ点の間隔 (2 割勾配, 時速 10km 走行時)

レーザ機器の性能	レーザの設置位置	MMSからの距離		
		5m	15m	25m
30万点/秒(本研究開発)	通常の高さ2.2m	2.5cm	17.1cm	29.6cm
55万点/秒	通常の高さ2.2m	1.4cm	9.3cm	16.0cm
30万点/秒(本研究開発)	改良の高さ4.0m	2.0cm	10.5cm	17.6cm
55万点/秒	改良の高さ4.0m	1.1cm	5.7cm	9.6cm

長さの亀裂は、15m 離れた法面で10cm 幅、25m 離れた法面で15cm 幅の検出ができる。また、円形に近い穴は、15m離れた法面で直径13cm、25m 離れた法面で直径20cm が検出できる。データ量の増大による処理時間の増加に関しては、処理ソフトウェアのアルゴリズムの進化や処理 PC の性能向上により解決できる。

※参考文献一覧

1. ダム管理向3次元地形測量と表示手法の研究. 西川啓一, 中村甚一, 井上達裕, 大西有三, 西山哲. 土木情報利用技術論文集, 15, pp.11-16, 2006.
2. モービルマッピングシステムと三次元空間情報管理システム(G-VIZ™)を用いた実都市空間モデリング&ウォークスルーシステム. 石川貴一郎, 村石隆介, 天野嘉春, 橋詰匠, 島嘉宏, 瀧口純一, 清水聡. 第13回ロボティクスシンポジウム 香川, 2008.
3. 航空レーザ測量, GPS 測量を用いた堤防高観測手法について. 豊岡河川国道事務所 調査課 調査係長 宮田 大悟, 平成 21 年度近畿地方整備局研究発表会 論文集 調査・計画・設計部門 I No.10, 2009
4. モービルマッピングシステムによる高分解能 DEM を用いた路面形状の管理に関する研究. 石川貴一郎, 高野 雅史, 島 嘉宏, 瀧口 純一, 天野 嘉春, 橋詰 匠, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, "1A2-B22(1)"-"1A2-B22(2)", 2009
5. モービルマッピングシステムによる都市空間モデリング. 石川貴一郎, 天野嘉春, 橋詰匠, 瀧口純一, 清水聡. 計測自動制御学会産業論文集, Vol.8, No.17, pp.132-139, 2009
6. Mobile Mapping System による三次元点群と時系列画像を用いた道路面補完に関する研究. 小倉徹也, 石川 貴一郎, 瀧口 純一, 天野 嘉春, 橋詰 匠. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, "1P1-B09(1)"-"1P1-B09(2)", 2010
7. 講座 わかって使うレーザ計測, 事例その4: 車両搭載型レーザ計測装置の利用. 西山哲, 沢田和秀, 里優. 地盤工学会誌, 60(3), Ser.No.650, pp.63-66, 2012.